

Non-invasive methods for the assessment of wall shear rate and arterial impedance

Citation for published version (APA):

Brands, P. J. (1996). *Non-invasive methods for the assessment of wall shear rate and arterial impedance*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Rijksuniversiteit Limburg.
<https://doi.org/10.26481/dis.19960531pb>

Document status and date:

Published: 01/01/1996

DOI:

[10.26481/dis.19960531pb](https://doi.org/10.26481/dis.19960531pb)

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.umlib.nl/taverne-license

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

repository@maastrichtuniversity.nl

providing details and we will investigate your claim.

Summary

The principal aim of this study was the development and implementation of non-invasive methods for the assessment of wall shear rate and arterial impedance by means of ultrasound. Wall shear rate is the near wall velocity gradient with respect to the radial position. Arterial impedance describes the opposition to pulsatile blood volume flow and is defined as the ratio of the spectral components of local pressure and local volume flow. Non-invasive assessment by means of ultrasound is the key to study hemodynamic parameters because it will not interfere with the physiological parameter(s) to measure. The assessment of wall shear rate demands accurate assessment of blood flow velocity profiles, while the assessment of arterial impedance demands the simultaneous and local assessment of center-line blood flow velocity and the diameter change of a blood vessel (distension). The accurate assessment of velocity profiles or the simultaneous assessment of distension and center-line blood flow velocity waveforms is possible with the use of radio frequency (RF) domain signal processing algorithms (Section 1.4.5) applied to ultrasound RF-signals (Section 1.4.3) acquired (Section 5.3) in echo system motion mode (M-mode) or Doppler-mode setting. The M-mode is preferred because of its higher resolution along the ultrasound beam. The RF-domain signal processing necessary to extract the time dependent information from the RF-signals received consists of discrimination of the different ultrasound RF-signal components (reflections, scattering and noise) by means of a discrimination filter, whereafter the temporal mean frequency of the different components is estimated by means of a mean frequency estimator. The temporal mean frequency of the reflection component in the RF-signals received is related to tissue velocity (vessel wall motion), while the temporal mean frequency of the scattering component (red blood cells) is related to blood flow velocity.

Chapter 1 gives an introduction to the global principles of ultrasound signal processing necessary for the assessment of distension and blood flow velocity profiles. Moreover, a brief description of the vascular system, the properties of the blood vessel wall and the employment of ultrasound for the assessment of hemodynamic variables is given.

The development of non-invasive methods for the assessment of wall shear rate and arterial impedance is concentrated on a few issues.

The first issue involves the introduction of mathematical principles (Section 2.3) and comparison (Section 2.4) of mean frequency estimators used in ultrasound applications for the assessment of blood flow velocity and/or tissue motion. There are two main classes of estimators: the model-based (or parametric) and model-free (or nonparametric) estimators. The parametric estimator assumes a model with a few characteristic parameters, while the nonparametric estimator assumes characteristic properties of a given process. Most of the mean frequency estimators employed in ultrasound applications are parametric estimators. From the class of parametric estimators it is the RF-domain cross-correlation model (CCM) estimator (Section 2.3.8)

(De Jong et al. 1990) that exhibits the best quality in the assessment of blood flow velocity and tissue motion (Hoeks et al. 1993).

The second issue concerns the principles of discrimination filters (Chapter 3) and the effect of these filters on the velocity estimation range (Chapter 4). Discrimination filters are necessary because RF-signals are composed of three major signal components, i.e., reflections, scattering, and noise (Section 1.4.5). To estimate (blood flow) velocity and (tissue) motion from the scattering and reflections received, it is necessary to discriminate between these RF-signal components. The discrimination, based on the difference in temporal properties of the RF-signal components, can be obtained with two classes of filters: static filters, having fixed filter characteristics, and dynamic filters, having adaptive filter characteristics (Section 3.3.5). The filter characteristics of a static filter are based on assumptions of signal properties, while dynamic filter characteristics are based on estimates of dynamic signal properties. The two classes of discrimination filters can be applied to both the RF-domain and the LF-domain (low frequency domain) (Section 2.3.1).

The third issue concerns the implementation of an adaptive discrimination filter in combination with the RF-domain cross-correlation model (CCM) estimator for the assessment of wall shear rate (Chapter 5). To determine wall shear rate from velocity profiles accurately, one must be able to assess unambiguously low blood flow velocities near the vessel wall. An important limitation of wall shear rate assessment by means of ultrasound is the discrimination between signals induced by slowly moving structures (reflections), like vessel walls, and those induced by slowly moving blood near the vessel wall (scattering). To overcome this limitation an adaptive discrimination filter was introduced to determine accurately near-wall flow velocity behavior. It was demonstrated that dynamic filtration, in combination with the CCM estimator, exhibits the best performance in the assessment of low (near wall) blood flow velocities (Chapter 4). The validation of wall shear rate assessment by means of ultrasound was performed through two *in vivo* studies (Chapter 5, Chapter 6) and one *in vitro* study (Chapter 6). The *in vivo* study in Chapter 5 concerns a pilot study of the reproducibility of peak wall shear rate assessment (5%) in comparison with the reproducibility of peak center-line blood flow velocity assessment (9%). The *in vivo* study in Chapter 6 concerns the comparison and reproducibility of mean wall shear rate (13%) in two subject populations of different categories of age. The *in vitro* study in Chapter 6 concerns a comparison in difference (9.4%) between wall shear rate assessed with ultrasound and with laser Doppler anemometry (LDA).

Finally a method was developed for the assessment of dimensionless arterial impedance by means of ultrasound (Chapter 7). Arterial impedance describes the relationship between the pressure and volume flow waveforms in the frequency domain. However, pulsatile pressure and volume flow waveforms, simultaneously recorded at the same location, are difficult to obtain non-invasively. The non-invasive assessment of dimensionless arterial impedance presented in this thesis is based on the ratio of the

harmonics of the normalized distension and normalized center-line blood flow velocity waveforms (Section 7.2) because both waveforms can be obtained non-invasively and simultaneously at the same location by means of ultrasound. The validation of this method for the assessment of dimensionless arterial impedance was performed through an in vitro study (Section 7.5) and an in vivo study (Chapter 8). The in vivo validation involved the reproducibility (29%) and the effect of age on arterial impedance. In agreement with the age related change in arterial wall properties there is a significant change with age in the non-invasive estimated arterial impedance. The in vitro study pertains to a comparison of the dimensionless ultrasound arterial impedance with the dimensionless spectral relationship of pressure and volume flow.

The thesis is concluded with a general discussion (Chapter 9).

Samenvatting

De doelstelling van deze studie was de ontwikkeling en implementatie van niet-invasieve meetmethoden voor de schatting van wandafschuifsnelheid en arteriële impedantie m.b.v. ultrageluid. Wandafschuifsnelheid is de snelheidsgradiënt (met betrekking tot de radiële positie) bij de vaatwand. Arteriële impedantie vormt de beschrijving van de tegenwerking (wrijving, traagheid, compliantie en weerstand) van de bloedvolumestroom en is gedefinieerd als de verhouding tussen de spectrale componenten van lokale bloeddruk en lokale bloedvolumestroom. Niet-invasieve schatting m.b.v. ultrageluid is de sleutel tot de studie van hemodynamische parameters omdat dit de fysiologische condities van de te meten parameter(s) niet of nauwelijks beïnvloedt. De schatting van wandafschuifsnelheid vereist een nauwkeurige schatting van bloedsnelheidsprofielen, terwijl de schatting van arteriële impedantie een nauwkeurige schatting van de simultaan en lokaal geobserveerde centrale bloedstroomsnelheid (snelheid in het midden van het vat) en verandering in diameter (distensie) als functie van tijd vereist. Deze nauwkeurige schatting van bloedsnelheidsprofielen of de simultane schatting van distensie en centrale bloedstroomsnelheid is mogelijk m.b.v. signaalverwerkings-algoritmen in het radio frequente (RF) domein (Paragraaf 1.4.5) toegepast op ultrageluids RF-signalen (Paragraaf 1.4.3), verkregen (Paragraaf 5.3) met een echosysteem in bewegingsmode (M-mode) of Doppler-mode. De RF-domein signaalverwerking nodig voor het verkrijgen van tijdafhankelijke informatie uit de ontvangen ultrageluids RF-signalen bestaat uit het onderscheid maken tussen de verschillende ultrageluids RF-signaal componenten (reflectie, verstrooiing en ruis) m.b.v. een discriminatie filter, waarna de tijdafhankelijke gemiddelde frequentie van de verschillende componenten kan worden geschat m.b.v. een gemiddelde frequentie schatter. De tijdafhankelijke gemiddelde frequentie van de reflectie component in de ontvangen RF-signalen is gerelateerd aan structuursnelheid (vaatwand), terwijl de tijdafhankelijke gemiddelde frequentie van de verstrooiingscomponent (rode bloedcellen) gerelateerd is aan de bloedstroomsnelheid.

Hoofdstuk 1 geeft een introductie van de globale principes van ultrageluids-signaalverwerking noodzakelijk voor het inschatten van distensie (verandering in diameter) en bloedstroomsnelheid. Bovendien wordt er een korte beschrijving gegeven van het bloedvatenstelsel, de eigenschappen van bloedvaten en de toepassing van ultrageluid voor het inschatten van hemodynamische parameters.

De ontwikkeling van de niet-invasieve meetmethoden voor wandafschuifsnelheid en arteriële impedantie is beschreven aan de hand van een aantal thema's.

Het eerste thema betreft de introductie van de mathematische principes en de onderlinge vergelijking van gemiddelde frequentieschatters (Hoofdstuk 2) zoals deze worden toegepast in ultrageluidsapplicaties voor het inschatten van bloedstroomsnelheid en/of weefselbeweging. Er zijn twee hoofdklassen van schatters: de model gebaseerde (of parametrische) en de niet model gebaseerde (of niet parametrische) schatters. De

parametrische schatters veronderstellen een model met een paar karakteristieke parameters, terwijl de niet parametrische schatters zijn gebaseerd op karakteristieke eigenschappen van een gegeven proces. De meeste gemiddelde frequentieschatters in ultrageluids applicaties zijn parametrische schatters. Binnen de klassen van parametrische schatters is het de RF-domein kruiscorrelatie model (CCM) schatter (Paragraaf 2.3.8) (De Jong et al. 1990) welke de beste kwaliteit bezit voor het inschatten van bloedstroomsnelheid en weefselbeweging (Hoeks et al. 1993).

Het tweede thema betreft de principes van discriminatie filters (Hoofdstuk 3) en het effect van deze filters op het bereik van de snelheidschatting (Hoofdstuk 4). Discriminatie filters zijn noodzakelijk omdat de ontvangen RF-signalen zijn opgebouwd uit een drietal signaal componenten namelijk: reflecties (weefsel en bloedvaten), verstrooiing (rode bloedcellen) en ruis (Paragraaf 1.4.5). Voor het inschatten van (bloedstroom)snelheid en (weefsel)beweging uit de ontvangen verstrooiing en reflecties is het noodzakelijk om deze RF-signaal componenten te scheiden. De discriminatie, gebaseerd op de verschillen in tijdafhankelijke eigenschappen van de RF-signaal componenten, kan worden bereikt met twee klassen van filters namelijk: statische filters en dynamische filters (Paragraaf 3.3.5). De statische filters zijn gebaseerd op aannames betreffende RF-signaal eigenschappen, terwijl de dynamische filters dynamisch reageren op veranderingen (adaptief) in RF-signaal eigenschappen d.m.v. schatting. Beide klassen van filters kunnen worden toegepast in het RF-domein en in het LF-domein (laag frequente domein) (Paragraaf 2.3.1).

Het derde thema betreft de implementatie van een dynamisch discriminatie filter in combinatie met de RF-domein kruiscorrelatie model (CCM) schatter voor de inschatting van wandafschuifsnelheid (Hoofdstuk 5). Om nauwkeurig de wandafschuifsnelheid te bepalen uit snelheidsprofielen is het noodzakelijk om lage bloedstroomsnelheden nabij de bloedvatwand te kunnen schatten. Een belangrijke beperking in de schatting van wandafschuifsnelheid m.b.v. ultrageluid wordt gevormd door de moeilijkheid in het onderscheiden van signalen afkomstig van langzaam bewegende structuren (reflecties van vaatwand) en signalen afkomstig van langzaam bewegend bloed (verstrooiing van rode bloedcellen) nabij de vaatwand. Om deze beperking te ondervangen is een dynamisch discriminatie filter geïntroduceerd. In hoofdstuk 4 is aangetoond dat een dynamisch filter in combinatie met de CCM schatter de beste eigenschappen bezit voor het inschatten van lage bloedstroomsnelheden nabij de vaatwand. De kwaliteit van het inschatten van afschuifsnelheid m.b.v. ultrageluid is onderzocht d.m.v. twee in-vivo studies (Hoofdstuk 5, Hoofdstuk 6) en een in-vitro studie (Hoofdstuk 6). De in-vivo studie in hoofdstuk 5 betreft de vergelijking in reproduceerbaarheid tussen piek wandafschuifsnelheid (5%) en piek centrale bloedstroomsnelheid (9%). De in-vivo studie in hoofdstuk 6 betreft de vergelijking en reproduceerbaarheid van gemiddelde wandafschuifsnelheid (13%) in een populatie van twee groepen met verschillende leeftijd. De in-vitro studie in hoofdstuk 6 betreft het verschil in wandafschuifsnelheid schatting (9.4%), gemeten m.b.v. ultrageluid en laser-Doppler.

Het laatste thema betreft de ontwikkeling van een methode voor het inschatten van dimensieloze arteriële impedantie m.b.v. ultrageluid (Hoofdstuk 7). Arteriële impedantie beschrijft de relatie tussen lokale bloeddruk en lokale bloedvolumestroom in het frequentie domein. Het simultaan niet-invasief meten van lokale bloeddruk en lokale bloedvolumestroom op dezelfde lokatie is moeilijk uitvoerbaar. De niet-invasieve schatting van dimensieloze arteriële impedantie zoals gepresenteerd in dit proefschrift is gebaseerd op de ratio van de golfvormen van de harmonische componenten van distensie en centrale bloedstroom-snelheid (Paragraaf 7.2). Beide golfvormen zijn m.b.v. ultrageluid simultaan en niet-invasief te schatten op dezelfde locatie. De kwaliteit van de schattingsmethoden voor dimensieloze arteriële impedantie m.b.v. ultrageluid is onderzocht in een in-vivo studie (Hoofdstuk 8) en in een in-vitro studie (Paragraaf 7.5). De in-vivo studie betreft de reproduceerbaarheid (29%) en het effect van leeftijd op dimensieloze arteriële impedantie. In overeenstemming met de leeftijd gerelateerde veranderingen in de eigenschappen van bloedvaten is er ook een significante verandering met de leeftijd in de dimensieloze arteriële impedantie. De in-vitro studie betreft een vergelijking van impedantie zoals geschat m.b.v. ultrageluid en berekend op basis van gemeten lokale druk en lokale volumestroom.

Dit proefschrift besluit met een algemene discussie (Hoofdstuk 9).